

Г.Д. ГРИЦЕНКО, НТУ “ХПІ”, **С.С. СТЕПАНОВ**,
О.І. СЛЮСАРЕНКО, **О.Є. ШАТАЛОВ**, канд. техн. наук,
 Львівський інститут сухопутних військ, м. Львів,
А.В. ГРАБОВСЬКИЙ, **А.Ю. ВАСИЛЬЄВ**, НТУ “ХПІ”

ЗАХИСТ ЛЕГКОБРОНЬОВАНОЇ ТЕХНІКИ: ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПІДВИЩЕННЯ БРОНЕЗАХИСТУ

Вказані недоліки бронювання легкоброньованої техніки. Описані деякі способи підвищення рівня захищеності. Запропонована методика дослідження описаних варіантів і розробки рекомендацій по підвищенню рівня захищеності легкоброньованої техніки.

The lightarmour vehicles armoring disadvantage are indicated. Protected level increase methods are described. It is suggested to conduct researches of the described variants and develop recommendation on hanging of level of protected of lightarmour technique.

Стан питання. Досвід застосування легкоброньованої техніки українським миротворчим контингентом в республіці Ірак та аналіз результатів озброєних конфліктів показав, що захист цієї техніки недостатній для виконання завдань в сучасних умовах. Як показали численні напади терористичних угруповань на колони наших підрозділів, особовий склад, який знаходився в цій техніці, не є захищеним від застосування таких засобів ураження як фугаси, ручні протитанкові гранатомети [1] і навіть стрілецька зброя. На рис. 1. показані результати обстрілу БТР-80. Видно, що корпус не захищений від дії кінетичних боєприпасів малого калібру.



Рис. 1. Результати обстрілу БТР-80 (Ірак, миротворчий контингент)

Напрямки підвищення бронезахищеності легкоброньованих машин (ЛБМ). Оскільки і сьогодні підрозділи Збройних сил України задіяні в миротворчих місіях, питання захищеності нашої техніки є актуальним. Один з шляхів розв'язання цієї проблеми – встановлення додаткового захисту у ви-

гляді ґратових (ґратоподібних), комбінованих екранів. Аналіз літератури, яка присвячена захисту бронетанкової техніки [2, 3], та інших джерел інформації [4] свідчить про підвищення інтересу спеціалістів до даного способу підвищення захисту. На рис. 2-3 представлені розробки російських вчених, які свідчать про суттєве підвищення захищеності БМП та БТР від таких засобів ураження як стрілецька зброя калібру 7,62 та 12,7 мм з дистанції 100...150 м, 14.5 мм – з дистанції 100...150 м та від гранат типу ПГ-9С при будь яких кутах обстрілу з вірогідністю 0,6.

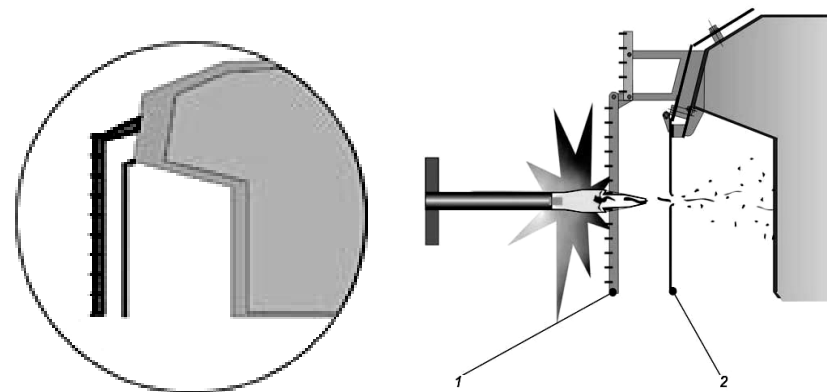


Рис. 2. Комбінований екран:

1 – ґратовий екран; 2 – броньовий екран



Рис. 3. Захисний комплект
для БМП, БТР

Гратові екрани, призначені для захисту від кумулятивних боєприпасів, встановлюються і на зразки бронетанкової техніки збройних сил коаліції інших держав, які розташовані в республіці Ірак (рис. 4).

Проблеми підвищення бронезахисту українського миротворчого контингенту в республіці Ірак Після неодноразового потрапляння колон наших підрозділів під обстріл з ручних протитанкових гранат (РПГ), стрілецької зброї та підривів фугасів, перед контингентом постала задача підвищення захищеності техніки від засобів ураження, які використовуються терористичними формуваннями. Оскільки військово-промисловий комплекс не випускав якихось додаткових засобів захисту, вирішення цього питання було покладене на підрозділи технічного забезпечення, які входили в штат контингенту. Особовий склад взводу технічного забезпечення 62-го окремого механізованого батальйону для вирішення цієї задачі використовував різноманітний підручний матеріал, такий як стійки інженерних загороджень для натягування колючого дроту. Командування технічного забезпечення 62-го окремого механізованого батальйону не мало ніяких рекомендацій щодо розміру відстаней між пластинами та між корпусом та екраном, товщини матеріалу пластин, тому ці параметри обиралися виходячи з інтуїції та з того, що на той час було під рукою. Зразки виготовлених захисних екранів були встановлені на легкоброньовану техніку батальйону (рис 5).



Рис. 4. Варіант підвищення захищеності, встановлений на БТТ сил коаліції (республіка Ірак)



Рис. 5. Результати виготовлення ґратових (ґратоподібних) екранів у 62-му окремому механізованому батальйоні

Однак встановлені екрани не є оптимальними, бо виготовлялися з підручних матеріалів без перевірок та аналізу. Виходячи з цього, високу актуальність набуває задача моделювання захисних властивостей різноманітних засобів захисту ЛБМ.

Постановка задачі. Кожна модернізація ЛБМ вирішує задачу багатопараметричної оптимізації. В якості таких параметрів виступають: рівень бронезахисту та вогнєвої могутності ЛБМ, міцність (жорсткість) елементів ЛБМ (корпус, підвіска і т. і.), рівень керованості машини, максимальна та комфортна швидкість руху [5], маса машини, забезпечення можливості перевезення авіацією, долаття водних перешкод на плаву і т.п. Крім того слід зазначити, що поліпшення одних характеристик може привести до серйозних погіршень інших. Особливо це стосується бойових колісних і гусеничних машин легкої категорії за вагою, до яких пред'являються підвищені тактико-технічні вимоги. Таким чином, при підвищенні захищеності (обладнання додатковими захисними екранами) збільшується вага бойової машини (маса захисного комплексу – 1400 - 2300 кг [4]), змінюються масово-інерційні характеристики усієї машини, підвищується навантаження на елементи корпусу, ходової частини та двигун. А оскільки такі захисні екрани у більшості випадків ставляться на машини, які вже знаходяться у експлуатації, були оптимізовані до існуючих характеристик і для яких раніше не передбачалося проведення подальшої модернізації, без комплексного аналізу і проведення додаткових розрахунків впливу вказаних змін на поведінку ЛБМ [6] неможливо передбачити всі зміни і запропонувати рекомендації для підтримання необхідного рівня тактико-технічних характеристик (ТТХ) або недопущення зниження окремих характеристик нижче визначеного рівня.

Подібні дослідження потрібно проводити у комплексному аналізі, спрямованому на досягнення максимальної ефективності ґратових екранів від таких засобів ураження, як стрілецька зброя, боєприпаси кумулятивної дії та ураження уламками мін і снарядів, які закладаються на узбіччі шляхів проходження колони при забезпеченні оптимального балансу між вагою екрана, жорсткістю підвіски та потужністю двигуна і т. д.

Розв'язання такої складної задачі можливе при використанні узагальненого параметричного підходу, який полягає в розробці моделей з різними типами параметрів (типи корпусів ЛБМ, типи екранів, товщини елементів корпусу та екрану, жорсткість підвіски, маса машини тощо) та проведенні багатоваріантних розрахунків впливу змін значень цих параметрів на рівень ТТХ машини.

Методи розв'язання. Для розв'язання поставленої задачі пропонується наступна методика, яка полягає у проведенні багатоваріантних розрахунків на базі параметричних та фізичних моделей, побудованих в CAD/CAE-системах. Загальна структура програмно-модельного комплексу для дослідження параметрів транспортних засобів спеціального призначення наведена на рис. 6.

Таким чином, для вирішення задачі модернізації легкоброньованих машин запропонованим способом необхідно:

1. Зібрати матеріал, який відображає конструктивні рішення по виготовленню ґратових екранів, з метою синтезу конструктивної схеми, що забезпечує максимальний рівень захищеності від таких засобів ураження, як кумулятивні боєприпаси, стрілецька зброя і уламки снарядів та бомб.

2. Розробити математичні моделі для дослідження ґратових екранів при взаємодії з вказаними засобами ураження.

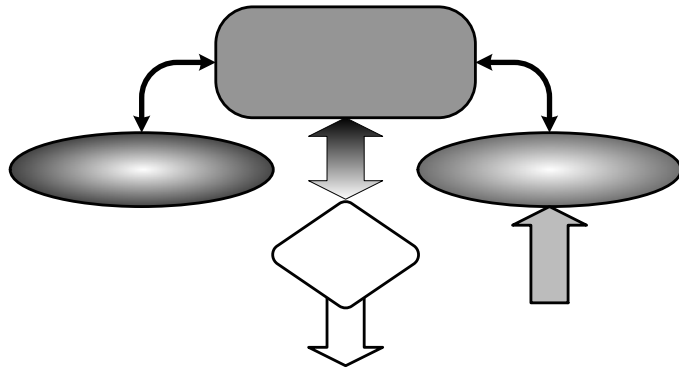


Рис. 6. Загальна структура програмно-модельного комплексу для дослідження параметрів транспортних засобів спеціального призначення ($P_{вх}$, $P_{вих}$ – вхідний і вихідний набори параметрів)

3. Розробити математичну модель (методику) оцінки рівня бронезахищеності для кожного типу ураження.

4. Розробити математичну модель для аналізу поведінки корпусів, агрегатів та машини в цілому для кожного варіанта модернізації і оцінки міцності та жорсткості корпусів та елементів.

5. Розробити математичну модель для аналізу керованості та інших характеристик пересування.

6. Провести комплексні багатопараметричні розрахунки для визначення впливу зміни окремих параметрів (матеріал, розміри між пластинами, розміри пластин, кут нахилу, товщину пластин, способи кріплення екранів та ін.), на ТТХ машини (рівень захищеності, керованість, тощо).

7. На базі результатів аналізу виконаних досліджень розробити рекомендації щодо конструкції ґратових екранів.

8. Виготовити ґратові екрани за результатами розрахунків та засоби для їх встановлення на ЛБМ.

9. Провести експериментальні дослідження.

10. Розробити рекомендації по підвищенню захищеності ЛБМ за допомогою ґратових екранів та зміни силового агрегату, характеристик елементів ходової частини та ін.

Математичні моделі. Математична модель для дослідження ґратових екранів складатиметься з: математичної моделі польоту засобу ураження; математичної моделі визначення параметрів зустрічі елементів корпусу та засобів ураження; математичної моделі взаємодії засобів ураження та елементів корпусу; математичної моделі визначення межі безпечних зон навколо машини;

математичної моделі аналізу динаміки поведінки багатовісних машин (рух, стрільба, подолання перешкод, тощо); математичної моделі визначення жорсткості та міцності елементів ЛБМ.

У математичні моделі для дослідження ґратових екранів входить математична модель для розрахунку швидкості кулі, яка дозволяє не тільки вважати, що снаряд рухається як матеріальна точка (рівняння (1)-(3)), а враховувати складну її поведінку на траєкторії (рис. 7):

$$m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = \vec{F}_T + \vec{F}_O \quad \text{або} \quad m \frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{F}_T + \vec{F}_O; \quad (1)$$

$$F_O = C_x \rho S V^2; \quad (2) \quad C_x = C_{x0} + \Delta C_x. \quad (3)$$

Рух тіла описується за допомогою радіус-вектора центру мас \vec{r} (рис. 7, б) і кутів Ейлера (φ, ψ, θ) (рис. 7, а), де φ – кут власного обертання, ψ – кут прецесії, θ – кут нутації. Кінематичні рівняння Ейлера, які пов'язують кути Ейлера з проекціями кутової швидкості на рухомі осі, представлені як (4):

$$\begin{cases} \omega_x = \frac{d\psi}{dt} \sin \theta \sin \varphi + \frac{d\theta}{dt} \cos \varphi; \\ \omega_y = \frac{d\psi}{dt} \sin \theta \cos \varphi + \frac{d\theta}{dt} \sin \varphi; \\ \omega_z = \frac{d\psi}{dt} \cos \theta + \frac{d\varphi}{dt} \end{cases} \quad (4)$$

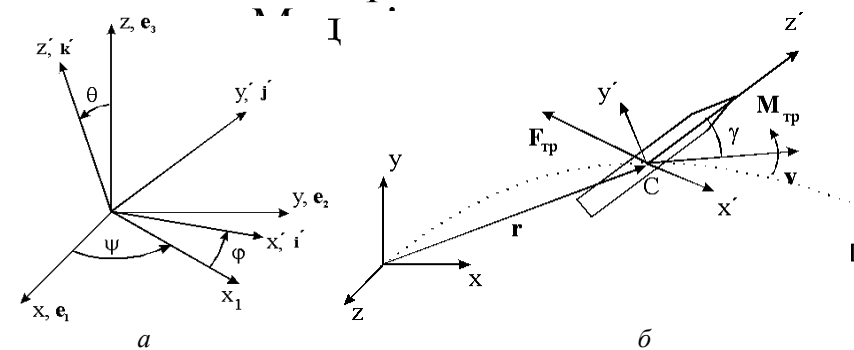


Рис. 7. Рух тіла у повітрі:

а – кінематика руху тіла у будь-який момент часу; б – положення тіла

Внаслідок цього з'явилася можливість врахувати зміну опору повітря при польоті кулі, яка викликає самонахил кулі і нутації на траєкторії [7].

При розрахунку кута зустрічі з броньовою перешкодою використовуємо ма-

САЕ- системи

ічні моде
що дос

Параметричний
аналіз і синтез

тематичну модель, що використовує рівняння нормалі, особливістю якого є те, що враховано випадки, коли зброя, з якої ведеться обстріл, розташовується вище або нижче місця положення машини. Крім того, враховуються кути, які задають положення броньованого корпусу бойової машини у просторі: кут тангажу (нахилу корпусу) та кут крену.

На рис. 8 представлені позначення кутів, які є вихідними для розрахунків кута зустрічі снаряда з перешкодою: δ_3 – кут обстрілу після повороту осей; φ_3 – кут падіння снаряда після повороту осей; β_3 – кут нахилу броні; γ_3 – кут підвороту броні; N_3 – вектор нормалі листа; V_3 – вектор руху кулі у момент зустрічі з перешкодою; α – кут зустрічі з бронєю.

Вектори нормалі та швидкості визначаються за формулами (5) та (6) відповідно:

$$N_3 = (\cos\gamma_3 \times \sin\beta_3, \sin\gamma_3 \times \sin\beta_3, \cos\beta_3), \quad (5)$$

$$V_3 = (\cos\delta_3 \times \sin\varphi_3, \sin\delta_3 \times \sin\varphi_3, \cos\varphi_3). \quad (6)$$

Таким чином, за методом, що пропонується, кут зустрічі для будь-якої поверхні бронемашини може бути визначений за допомогою формули нормалі (7), загальної для усіх типів поверхонь:

$$\alpha = \arccos((V_{x3} * N_{x3} + V_{y3} * N_{y3} + V_{z3} * N_{z3}) / (|V_3| * |N_3|)). \quad (7)$$

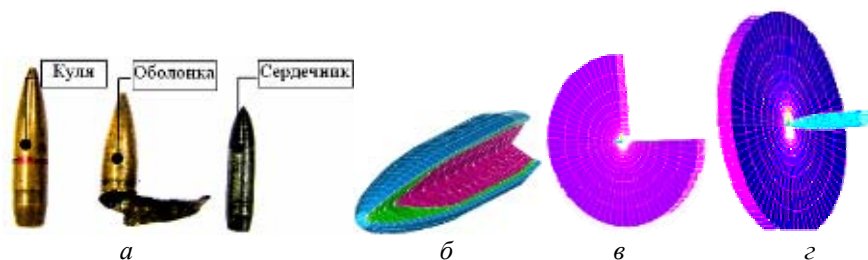


Рис. 9. Геометрична модель кулі і її прототип:

а – реальна куля Б-32; б – геометрична модель; в – мішень з скінчено-елементною сіткою (три чверті моделі); г – модель з скінчено-елементною сіткою для розрахунків

Розглянемо створення скінченно-елементних просторових моделей снаряду і перешкоди для моделювання динамічної взаємодії „снаряд – перешкода”. У випадках, коли відсутні необхідні для проведення досліджень експе-

риментальні графіки $V(\alpha)$, що характеризують залежності швидкості боєприпасу $V_{мпп}$ (при якій відбувається наскрізне пробиття) від кута зустрічі α , їх пропонується визначати за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ). Метод передбачає побудову геометричної моделі снаряду (кулі) і перешкоди. На рис. 9 представлено кулю типу Б-32, моделі кулі і перешкоди з скінченно-елементною сіткою для розрахунків (рис. 10).

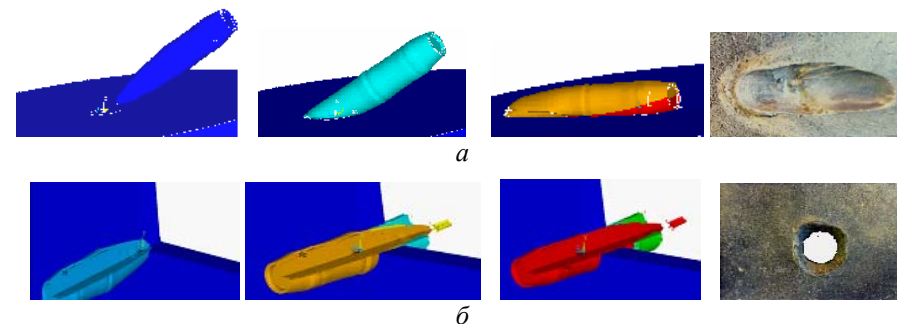


Рис. 10. Результати моделювання:

а – вибивання пробки; б – явище рикошету

Розрахунки виконувались за методом Лагранжа, Ейлера і лагранж-ейлеровим підходом. У ситуації, коли одна частина системи поводить як рідина, а інша – як тверде тіло, для опису руху твердої частини може бути застосований лагранжевий підхід, а для опису руху рідини – ейлерів. В нашому випадку при моделюванні взаємодії даних частин може бути використаний алгоритм лагранжево-ейлерового зв'язування. МСЕ поєднаний з сучасними CAE (Computer Aided Engineering) системами верхнього рівня (ANSYS, LS-DYNA та ін.).

У основі підходу Лагранжа лежать рівняння збереження маси, кількості руху і внутрішньої енергії, а також замикаюче цю систему визначальне співвідношення. Розглянемо особливості просторово-часової дискретизації при розв'язанні перерахованих рівнянь. Рівняння збереження маси (8), кількості руху (9) і енергії (10):

$$\dot{\rho} + \rho \operatorname{div}\{v\} = 0, \quad (8)$$

де ρ – густина; $\{v\}$ – вектор швидкості точок середовища.

$$\rho\{\ddot{x}\} = \rho\{g\} + \operatorname{div}[\sigma], \quad (9)$$

де $\{\ddot{x}\}$ – прискорення; $[\sigma]$ – тензор напруг Коші; $\{g\}$ – вектор прискорення вільного падіння,

$$\rho\dot{u} = [\sigma]:[D] + \rho r - \nabla \cdot \{q\}, \quad (10)$$

де \dot{u} – швидкість зміни внутрішньої енергії; $[D]$ – тензор швидкості дефор-

мації; r – інтенсивність об'ємного теплового джерела; $\{q\}$ – тепловий потік; ∇ – оператор Гамільтона; „ \bullet ” – скалярний добуток; „ \cdot ” – подвійний скалярний добуток, а також замикаюче цю систему визначальне співвідношення

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\}. \quad (11)$$

Після розв'язання задачі щодо визначення швидкості кулі у момент зустрічі, кута зустрічі та швидкості, необхідної для пробиття перешкоди, стає можливим отримати дані щодо небезпечних дальностей та напрямків, з яких можливе ураження перешкоди. При розв'язанні цієї задачі (визначення координат точки пострілу) використовується метод, відмінністю якого є застосування „зворотного” розрахунку траєкторії польоту снаряда (рис. 11).

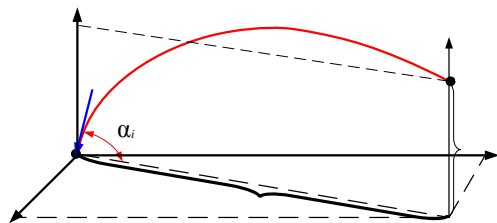


Рис. 11. Залежність висоти польоту від дальності

Таким чином, проводимо розрахунки параметрів (матеріал, розміри між пластинами, розміри пластин, кут нахилу, товщину пластин, способи кріплення екранів) та порівнюємо результати розрахунків, будуючи тактичні діаграми. На рис. 12 показана побудована по результатам розрахунків тривимірна тактична діаграма [8].

Зупинившись на оптимізованому варіанті ґратового екрану, який відповідає необхідним характеристикам, приступаємо до аналізу характеристик, які впливають на моторно– трансмісійне відділення, ходову частину і т. д. [9].

У математичній моделі розрахунку масо-інерційних характеристик машин використовуємо рівняння руху, які отримуємо з рівняння Лагранжа 2-го роду:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial T}{\partial q} = - \frac{\partial \Pi}{\partial q}, \quad (12)$$

де $T(q, \dot{q}, t)$ – кінетична енергія системи; q – стовбець узагальнених координат системи (розміром n); $\Pi(q, t)$ – потенціальна енергія системи.

Рівняння руху після розрахунку похідних мають вигляд:

$$M(q, t)\ddot{q} = Q(q, \dot{q}, t), \quad (13)$$

де M – матриця мас системи розміром $n \times n$; Q – вектор узагальнюючих сил.

Приведений спосіб отримання рівнянь руху доволі простий, але для реальних технічних систем, які побудовані з багатьох деталей, складання рівнянь вручну є достатньо об'ємною задачею. Тому для розв'язання таких задач будемо використовувати автоматизовані програмні комплекси для автоматичного складання і розв'язання рівнянь руху [10]. На рис. 13 показаний приклад постановки задачі та результати подібних розрахунків.

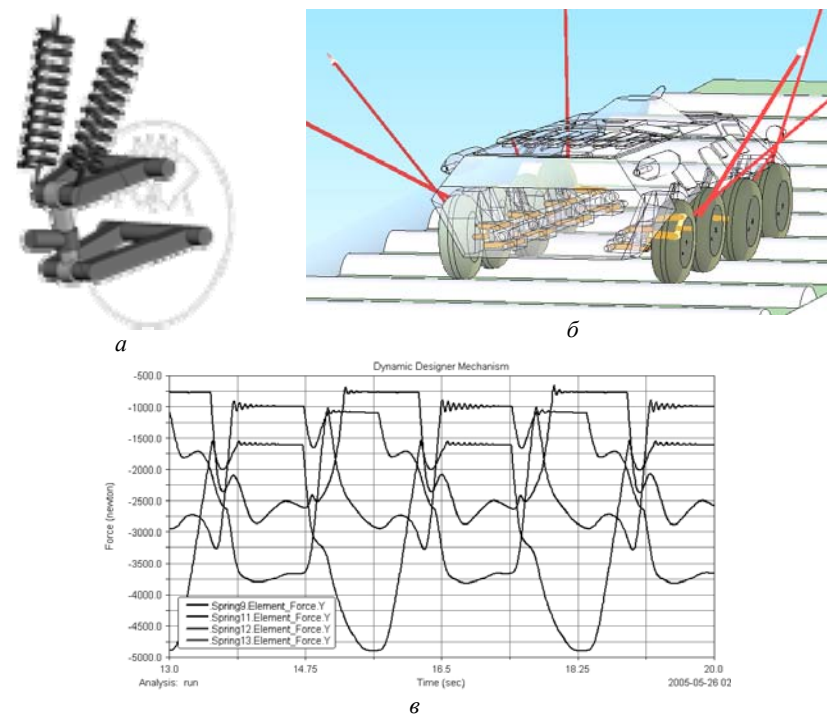


Рис. 13. Порядок розрахунку масо-інерційних характеристик машин: а – фізична модель підвіски БТР-80; б – моделювання подолання перешкод БТР-80; в – графік зусиль в амортизаторах БТР-80

Для розв'язання задачі визначення міцності та жорсткості елементів ЛБМ математична модель буде побудована на основі МСЕ, основною формулою для статичних розрахунків на міцність є:

$$V_i$$

$$[K]\{X\} = \{F\}, \quad (14)$$

де $[K]$ – глобальна матриця жорсткості скінченно-елементної моделі; $\{X\}$ – шуканий вектор вузлових переміщень моделі; $\{F\}$ – глобальний вектор навантажень.

На рис. 14 показаний приклад результату подібних розрахунків.

Висновки: Більша частина результатів досліджень, які були проведені під час афганської та інших кампаній по підвищенню захищеності ЛБМ за допомогою навісних екранів різної конструкції, на жаль, залишилась у науково-дослідних установах і лабораторіях заводів – виробників цієї техніки в інших країнах СНД. В той же час досвід проведення кампаній у сучасних військових конфліктах наочно свідчить про ефективність використання таких специфічних екранів.

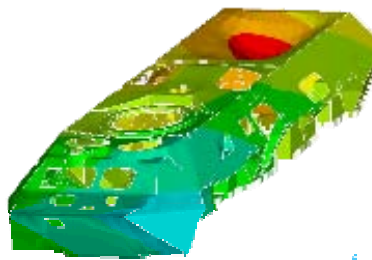


Рис. 14. Деформація корпусу БТР-80 під дією навантаження

Сучасний стан розвитку програмно - апаратного забезпечення дозволяє більш ефективно і з меншими матеріальними затратами розв'язувати задачі підвищення тактико-технічних характеристик. В подальшому планується розробка більш детальних моделей елементів бронювання та моделювання їхньої реакції на дію кінетичних обертів.

Список літератури. 1. <http://armor.kiev.ua/indix.html>. 2. Ильин В. БМП совершенствуются. // Техника и вооружение: вчера, сегодня, завтра. – 2003. – № 8. – С.48. 3. Степанов С. К вопросу о машинах поддержки или сопровождения танков. // Техника и вооружение вчера, сегодня, завтра. – 2003. – №4. – С.34. 4. <http://niistali.ru/>, <http://www.soldiering.ru/army/>. 5. Пелешко Є.В., Грабовський А.В., Танченко А.Ю. Використання сучасного програмного забезпечення для розрахунку динамічних характеристик підвіски БТР-80 // Науково – практична конференція (22 – 23 грудня 2004 р.) "Стан і розвиток Сухопутних військ на сучасному етапі. Проблеми розвитку озброєння та техніки Сухопутних військ". – Харків: ХІТВ НТУ "ХПІ", 2005. – С.161-164. 6. Грабовський А.В., Грищенко Г.Д., Танченко А.Ю., Ткачук Н.А. Моделирование динамики корпуса транспортного средства специального назначения // Вісник НТУ "ХПІ". Тематичний випуск "Машиноведение и САПР" – 2006. – №24. – С.54-70. 7. Ткачук А.Н., Шаталов О.Е., Ларин А.Ю., Васильев А.Ю., Мартыненко А.В. Расчет траектории полета пуль и снарядов с учетом угла нутации, прецессии и собственного вращения // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2005. – №3. – С.38-42. 8. Шаталов О.Е., Ларин А.Ю., Васильев А.Ю., Мартыненко А.В., Ткачук А.Н., Грабовский А.В. Математическое представление построения трехмерных тактических диаграмм с учетом движения и изменения ориентации корпуса бронированной машины в пространстве // Вестник НТУ "ХПІ". Тематический выпуск „Машиноведение и САПР” – 2005. – №53. – С.152-161. 9. Васильев А.Ю., Малакей А.Н., Пелешко Е.В., Шаталов О.Е. К вопросу интегрированных систем анализа динамических процессов в корпусах транспортных средств специального назначения // Механіка та машинобудування. – 2004. – №1 – С.51-60. 10. Васильев А.Ю., Мартыненко А.В., Шаталов О.Е., Пелешко Е.В. Комплексный подход к модернизации корпусов легкобронированных машин с использованием современных программных комплексов // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – 2005. – №26. – С.169-174.

Поступила в редколлегию 30.01.07